

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 多重化による通信	2
1.2.1 波長分割多重 (WDM) 通信	2
1.2.2 空間多重化 (SDM)	3
1.3 光共振器	3
1.3.1 光共振器とは	3
1.3.2 微小光共振器	3
1.3.3 光周波数コム	4
1.4 光集積回路とシリコンフォトニクス	5
1.4.1 光集積回路	5
1.4.2 シリコンフォトニクス	6
1.4.3 シリコンナイトライド (SiN)	8
1.5 異種材料間接合	10
1.5.1 InP/Si 接合	10
1.5.2 Si/SiN 接合	11
1.5.3 エッジカプラ	13
1.6 本研究の目的	15
第2章 理論	16
2.1 光伝搬理論	16
2.1.1 マクスウェル方程式	16
2.1.2 境界条件	17
2.1.3 ポインティングベクトル	17
2.1.4 スラブ導波路での電界モード	17
2.1.5 NA(開口数)	21

2.1.6	フラウンホーファー回折	22
2.1.7	スポット半径	23
2.1.8	パワーの反射率と透過率	23
第3章 SiN/Si 接合実験		25
3.1	実験系の構築	25
3.2	SiN,Si チップ	27
3.3	実験方法	27
3.3.1	SiN,Si の透過率測定	27
3.3.2	SiN/Si 接合時の結合効率測定	28
3.3.3	各軸方向へのミスアライメントと結合効率の関係の測定	29
3.3.4	インデックスマッチング溶液を用いた結合効率，各軸方向へのミスアライメントと結合効率の関係の測定	29
第4章 実験結果		30
4.1	SiN,Si の透過率，SiN/Si の結合効率	30
4.2	各軸方向へのミスアライメントと結合効率の関係の測定	32
4.2.1	シミュレーション結果との比較	32
4.2.2	NA の検討	34
4.3	インデックスマッチング溶液使用時の結合効率の測定	35
4.3.1	インデックスマッチング溶液使用時と不使用時の比較	35
4.4	インデックスマッチング溶液使用時の各軸方向への位置ズレと結合効率の測定	36
4.4.1	インデックスマッチング溶液不使用時との比較	36
4.4.2	NA の検討	37
第5章 結論		38

第1章 序論

1.1 はじめに

世界の総トラフィック量は指数関数的に増え続けており、これはインターネットが普及して以来、この傾向は留まることを知らない。それに加え、最近では COVID-19 の流行により、これまでオフラインにより行っていた多くのことも、通信を介して行われるようになってきた。そのため、今後も世界の総トラフィック量の増大は続くと考えられる。それに伴って、様々な大容量通信を行うための技術が開発されてきた。しかし、多くの手法が大規模な装置を要したり、データ量の増加から更なる高速な処理、多くの電力を必要とされる。そのため、高性能でかつ、消費電力が少なく、小型化が可能な技術開発が求められている。

そこで、注目されているのが「光集積回路」である。これは光によって通信を行うために用いられる光回路である。光集積回路は、その性質から高速に通信を行うことができる上に、既存の電気回路と比較して、抵抗やコンデンサーにおける熱損失を失くすことができるため、究極的な省エネルギーにつながる。さらに、多波長光源になりうる光周波数コムと既存の大容量通信を行うための技術である WDM 通信等に関連づけることで装置の小型化が見込める。光集積回路の材料として Si が、その量産性の高さや機能面で注目されている。

1.2 多重化による通信

情報を伝送するための手法として、多重化通信というものがある。これは一つの伝送路に複数の情報を載せて通信を行う。

1.2.1 波長分割多重 (WDM) 通信

WDM(Wavelength Division Multiplexing) 通信とは光を用いて大容量通信を行う手法であり、1本の光ファイバ内に複数の波長の光を伝達させることで、1本のファイバでの伝送容量を波長チャンネル倍に増加させる技術である。具体的には複数の波長の信号を合波器 (MUX: Muxlexer) により合波し、光ファイバ上を伝送された後に、分波器 (DEMUX: Demultiplexer) で分波され、フォトディテクター (PD: Photodetector) で検出する。Fig.1.1 に示すように、光ファイバ1本ごとの伝送容量は1990年から2010年頃までで約10万倍も増大してきており、研究用で100Tb/sまで達成している。WDM通信技術はその伝送容量の増大に大きく貢献している。[1-3]

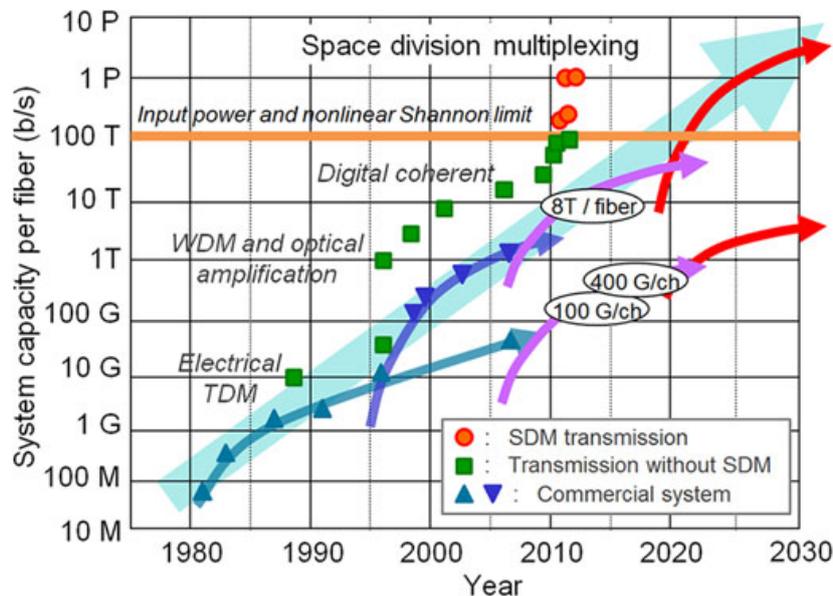


Fig.1.1: Transmission capacity per optical fiber in research and commercial systems.[Takayuki Mizuno, *et al.*, "Dense Space-Division Multiplexed Transmission Systems Using Multi-Core and Multi-Mode Fiber", *Journal of Lightwave Technology*, **34**,2, 2016.]

WDM の内、波長間隔の狭く (100GHz など)、多数チャンネルのものを DWDM(Dence

Wavelength Division Multiplexing) といい, EDFA(Erbium-doped fiber amplifier) により光増幅することで, 長距離・大伝送容量通信を達成した. 一方で, 全てオンチップで実装される電気通信と比較すると, WDM 通信は通信を行うにあたり分波器や合波器が必要になり, 普及されていない現実がある. そのため各素子の更なる小型化が求められる.

1.2.2 空間多重化 (SDM)

空間多重化 (SDM) は光ファイバ中の空間的な自由度を利用した多重化技術のことでありマルチモードファイバや, マルチコアファイバが光ファイバとして用いられる. SDM と先述した WDM などの技術を組み合わせることで Fig.1.1 のように更なる伝送容量の増大が見込める.

1.3 光共振器

1.3.1 光共振器とは

個体や波動などの振動系が固有振動数で振動している際に, 外部からその固有振動数の刺激が加わると, 振動が増幅する. この現象を共振 (resonance) という. この共振現象は例えば, コイルとコンデンサが用いられた電気回路ではそれぞれのリアクタンスが等しいとき (このときの周波数を共振周波数という.) に発生する. 同様にして共振は光に対しても発生し. 光の共振を発生させる光学系のことを光共振器 (optical resonator) という. 光共振器内に共振波長 λ を持つ光を通すと閉じ込められ, 光共振器内を光が周回し, 共振が起こり電解強度が増幅される. 後述する微小光共振器には平面鏡共振器, ファブリ・ペロー共振器, 球面鏡共振器, リング共振器など様々な種類がある. 例えば, リング共振器の λ は共振器の 1 周分の光路長 R , 自然数 m を用いて (1.3.1) 式で表される.

$$R = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3 \dots) \quad (1.3.1)$$

1.3.2 微小光共振器

光共振器の中でもそのサイズが数百 nm~数 μm の共振器を微小光共振器と呼び, 光の閉じ込めた際のモード体積 V が小さく, 光の電界強度が大きくなるので様々な非線形光学効果を小さいパワーで発生し, 多様な応用が期待される. しかし, 実際の光共振器では光共振器内の材料による吸収や散乱, 他の光学素子に接続する際に光が漏れ出す結合損失などが存在する. これによって光は減衰してしまう. そのため光を閉じ込めることができる時間は有限である. この性能を表す指標となるのが Q 値 (Quality factor) と呼ばれる

数値であり，この数値などを元に損失の小さい微小光共振器を設計する必要がある．

1.3.3 光周波数コム

光周波数コムは，時間領域において周期的なパルス列として，周波数領域において等間隔に並んだモードを持つ櫛（コム）状のスペクトルを持つ光信号である．この技術は Hänsch と Hall 氏らにより開発された技術で 2005 年にノーベル物理学賞が授けられた．光周波数コムの n 番目のスペクトル線の周波数 f_n は周波数間隔 f_{rep} の n 倍とコムのモードがゼロ周波数まで広がっているとときの最小のモードの周波数 f_{ceo} （キャリアエンベロープオフセット周波数）の和として (1.3.2) 式のように表される．

$$f_n = f_{ceo} + n \cdot f_{rep} \quad (1.3.2)$$

また，周波数軸上の光周波数コムをフーリエ変換した際の時間軸上のパルス列の時間間隔は $1/f_{rep}$ となる．この光パルスにおいてキャリア電場のピークと包絡線のピーク間の位相（キャリアエンベロープオフセット位相）のずれ $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ は以下の (1.3.3) 式で表される．

$$f_{ceo} = f_{rep} \cdot (\Delta\phi/2\pi) \quad (1.3.3)$$

これらの 2 式によりマイクロ波領域と周波数領域とを関連付け測定することができる． [5]

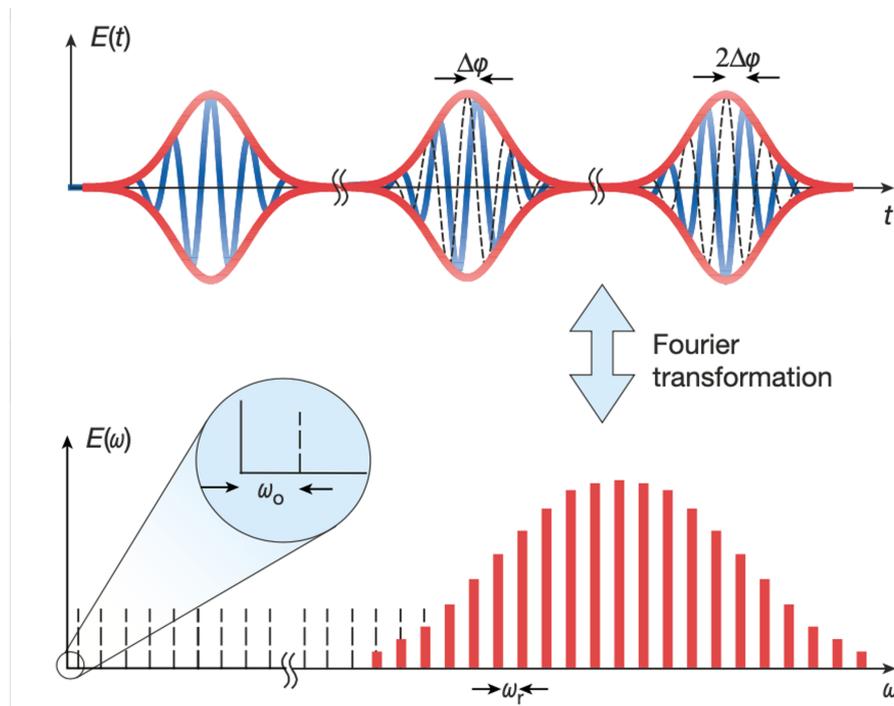


Fig. 1.2: T. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, “Optical frequency metrology,” *Nature*, 416, 233 – 237, 2002.

この性質から光周波数コムは光周波数を精密に測定することができるため、「光の物差し」として比喩される。光周波数コムは広帯域に広がるので光の物差しとして赤外、可視、紫外領域において機能する。[6–8] それだけではなく、光周波数コムは精密分光、原子時計、超低温ガス、分子フィンガープリントなどの幅広い応用先がある。[5] さらに、Fig.1.3 に示すように光周波数コムを多波長光源として用いることで、先述した WDM 光通信において各波長の光源を用いて通信を行う必要がなくなり、より高効率で光伝送を行うことができるようになることが期待される。[9]

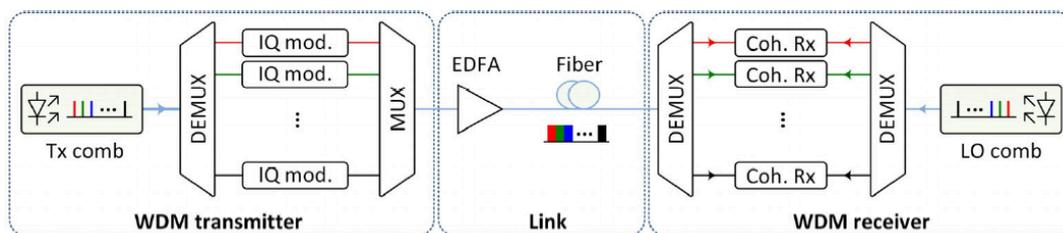


Fig. 1.3: Setup of a coherent WDM transmission link using optical frequency combs as light sources both at the transmitter and the receiver.(Kemal, Juned N, *et al.*,”Coherent WDM transmission using quantum-dash mode-locked laser diodes as multi-wavelength source and local oscillator”,*Optics Express Open Access* **27**,22, 31164-31175,2019)

1.4 光集積回路とシリコンフォトニクス

次に光集積回路とシリコンフォトニクスについて述べる。

1.4.1 光集積回路

光集積回路とは、レーザー、光導波路、光検出器などの複数の光学素子をチップスケールに集積し、幅広い機能を持たせるようにした光回路のことである。光集積回路は従来の電気を用いる集積回路と比較して処理速度が速い上に、抵抗等における損失がないため省電力で大容量通信を行えると期待されている。先にも述べたように、WDM 通信を行うためには光源の他に分波器、変調器、合波器などの素子が不可欠となる。この WDM 通信を光集積回路で実現し、光で大容量通信を行うための研究が多く進められている。中でも Si 基板を用いて光集積回路についての研究 (シリコンフォトニクス) は注目されている。

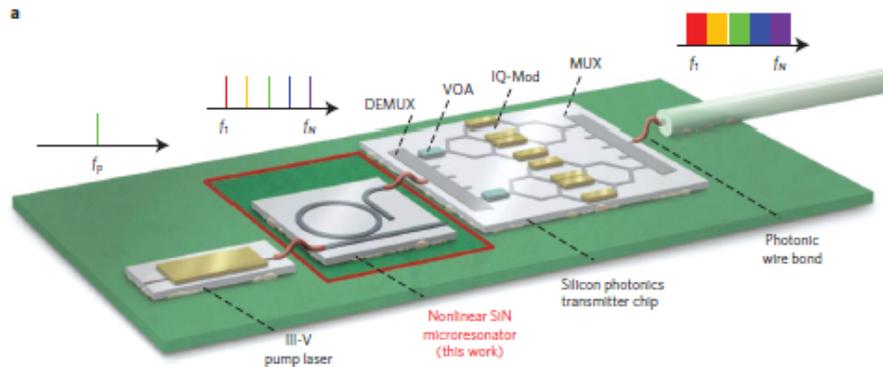


Fig. 1.4: Principles of coherent terabit-per-second communications with Kerr frequency combs. Artist's view of a future chip-scale terabit-per-second transmitter, leveraging a Kerr frequency comb source. The demonstration of coherent data transmission with Kerr combs is the subject of this work. DEMUX, de-multiplexer; VOA, variable optical attenuator; IQMod, IQ-modulator; MUX, multiplexer. [J. Pfeifle, *et al.*, "Coherent terabit communications with microresonator Kerr frequency combs," *Nat. Photonics* 8, 375-380 (2014)]

1.4.2 シリコンフォトニクス

シリコンフォトニクスは 2004 年以降開発ペースが加速しており、CMOS との互換性があることが確認された。これにより既存のデバイスの製造技術を、「高速・広帯域・省電力」な通信を行える光通信に流用することができる。シリコンフォトニクスの研究の多くは高速 Si 変調器、Si ラマンレーザー、増幅器、などの様々な光学素子の開発に焦点がおかれている。その中でも高速・大容量光通信のための光検出器の低コスト化、小型化にも期待されており、2010 年の研究では 8 個の高速 Si 変調器と DEMUX, MUX をモノリシック集積した光集積回路を用いた実装実験が報告されており、結果としてはチップ全体の損失は 10 dB の内 6.4 dB が DEMUX, MUX, 2 dB が高速位相変調器, 1.6 dB がマッシュエンダー変調器 (MZM) における損失であった。Fig.[1.5] に示すようにこの集積回路は 8 つのチャンネルでそれぞれ伝送容量が約 25 Gb/s となり、合計で 200 Gb/s のデータ伝送が可能となった。[10] これは光集積回路を用いた高速・大容量通信の実現可能性を示す重要な結果であった。

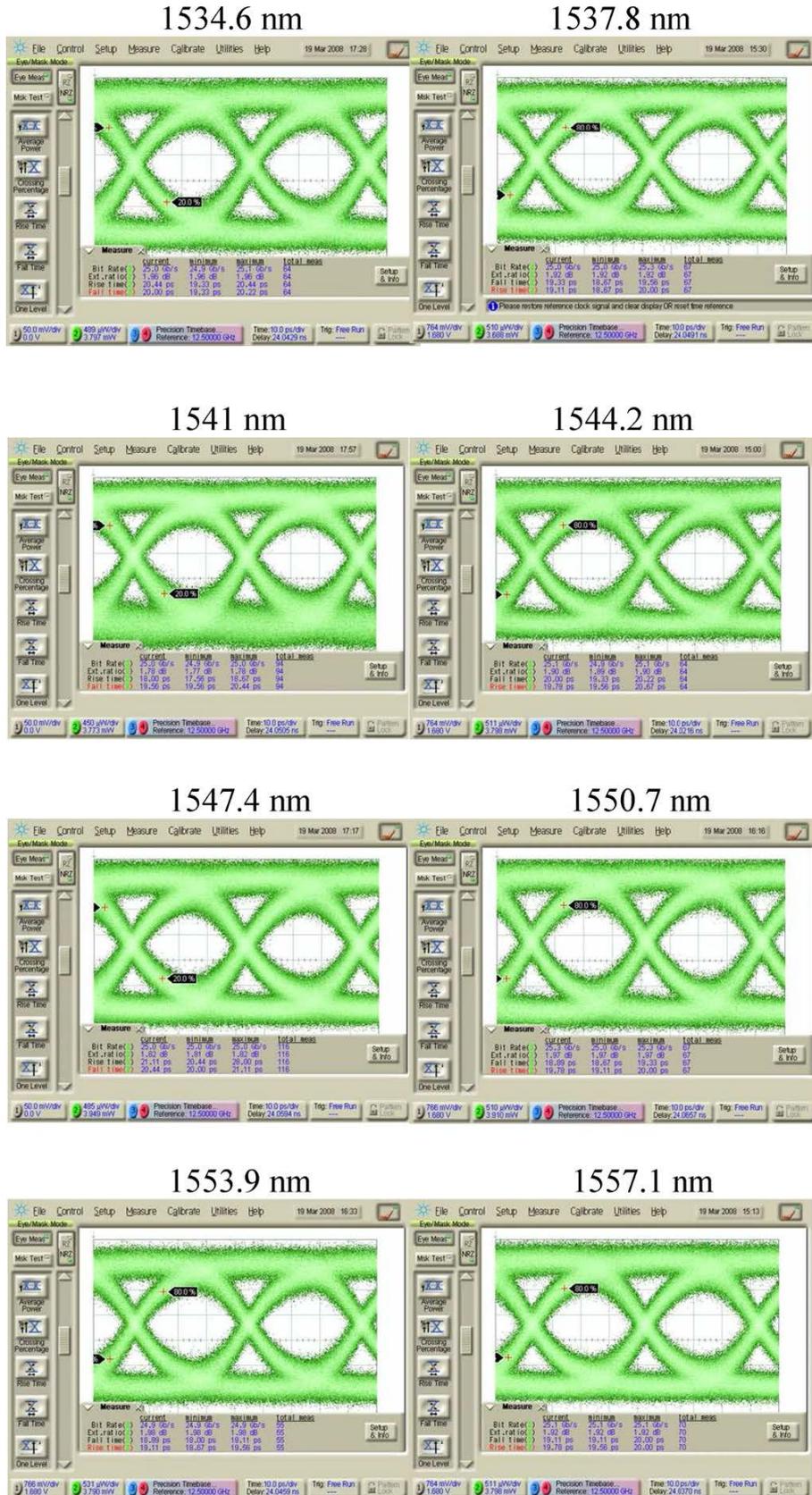


Fig. 1.5: Optical eye diagrams of the eight wavelength channels of the Si PIC. Each is transmitting data at 25 Gb/s with 19 ps rise time, 19 ps fall time, and 2 dB ER. Optical wavelength for each channel is shown on top of the eye diagram. (Liu, Ansheng, *et al*, "Wavelength division multiplexing based photonic integrated circuits on silicon-on-insulator platform", IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, **16**, 1, 23-32, 2010)

一方、Si の欠点についてだが、通信波長帯である 1550 nm 付近で 2 光子吸収が起きることにより、光周波数コムを立たせることが困難であり多波長光源として機能せず Si のみでのモノシリック集積ができないという点がある。また各素子の製造についてだが、Si 導波路は Silicon-on-insulator (SOI) 構造として製造される。SOI 構造は Si コア周りが SiO₂ で覆われた構造のことであり、より高効率に光の閉じ込めを行うことができる。

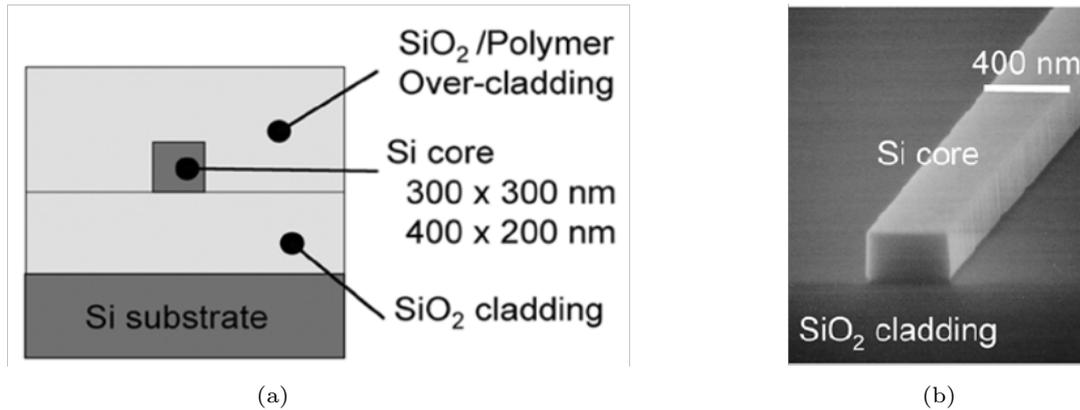


Fig. 1.6: (a):Schematics of the Si wire waveguide structure.,(b):SEM images of a 400-nm-wide Si wire. (Tsuchizawa, Tai,*et al.*,"Microphotronics devices based on silicon microfabrication technology",IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics ,11,1, 232-239,2005)

1.4.3 シリコンナイトライド (SiN)

先述したようにシリコンフォトニクスは多様な利点が存在する一方で、多波長光源にならないという欠点も存在する。これは全ての光学素子をオンチップに実装するにおいて致命的である。そこで、SiN を多波長光源として用いることを考える。この場合、この二つの材料の異種混載が不可欠となる。SiN の特徴としては、まず、Fig.1.7 に示すように、広帯域な光周波数コムの生成に長けているという点があげられる。また、SOI の透過波長が 1.1 μm~4 μm で可視光領域を含まないのに対し、SiN は 0.4 μm~4 μm で可視光領域まで透過するほどの透過範囲を持っているということがあげられる。さらに導波路損失についてだが、SiO₂ 層が十分に厚い場合においては導波路側壁の表面粗さが損失の主な原因となり、以下の (1.4.1) 式にて表される Δn^2 に比例する。 [11]

$$\Delta n^2 = n_{core}^2 - n_{cladding}^2 \quad (1.4.1)$$

そのため Fig.1.8a に召すようにクラッドの材料である SiO₂ ($n = 1.457$) との屈折率差が Si と比較して小さく、導波路損失が大きくなると考えられ、0.3 dB/m の導波路損失が報告されている。 [12]

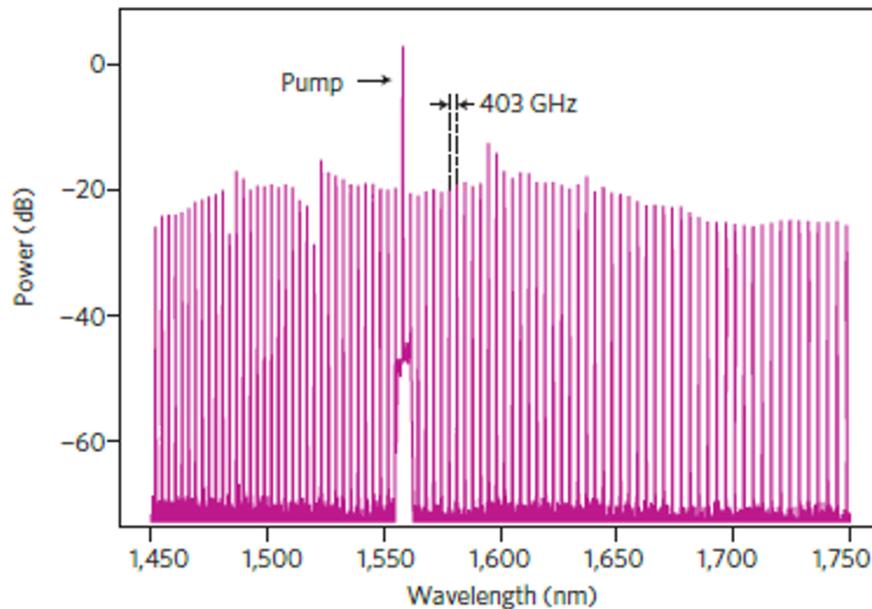


Fig. 1.7: Output spectrum of a 58- μ m-radius SiN ring-resonator optical parametric oscillator with a single pump wavelength tuned to resonance at 1,557.8 nm. It shows numerous narrow linewidths at precisely defined wavelengths. The 87 generated wavelengths were equally spaced in frequency, with a FSR of 3.2 nm. (Moss, David J. *et al.*, "New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and Hydex for nonlinear optics", *Nature Photonics*, **7**, 8, 597-607, 2013)

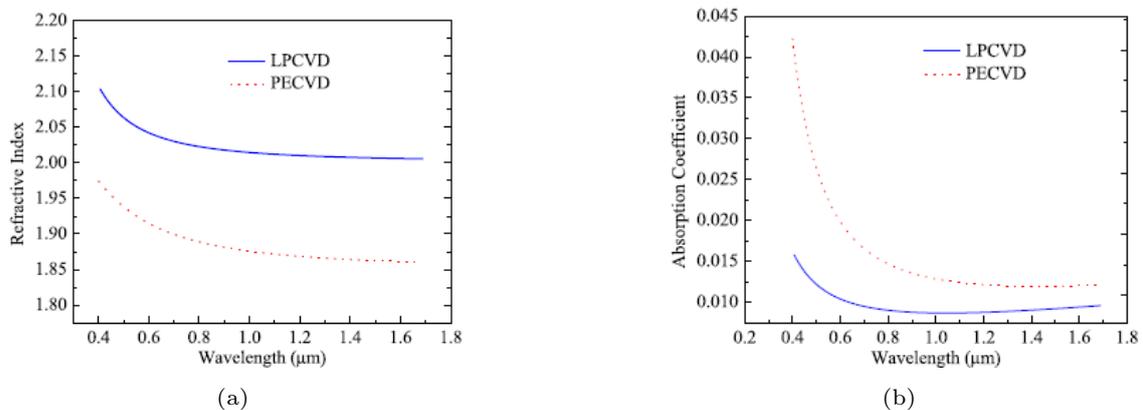


Fig. 1.8: Refractive index (top) [43] and absorption coefficient (bottom) of typical LPCVD (blue) and PECVD (dotted red) SiN for the visible and IR wavelength regime. (Abdul Rahim, *et al.*, "Expanding the Silicon Photonics Portfolio With Silicon Nitride Photonic Integrated Circuits", *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, **35**, 4, 2017)

さらに Fig.1.8b に示すように、Si は 2 光子吸収が主な原因となり吸収損失が大きくなる一方で、SiN は吸収係数を通信波長帯においても低く保てる。欠点としては Si と比較

して製造難易度が上がることで、ドーピングが困難なことにより、p-n 接合が形成できない。よって電気変調を行うことができず、変調器などの光学素子を構成することが困難であることが挙げられる。以上のように、光集積回路を用いて光通信を行うことにおいて Si, SiN は互いに補完関係にある。

Table. 1.1: Characteristics of silicon photonics using silicon and silicon nitride platforms the transparency range, typical values in the C-band are quoted., [Abdul Rahim, et al., "Expanding the Silicon Photonics Portfolio With Silicon Nitride Photonic Integrated Circuits", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, **35**, 4, 2017]

	Silicon	Silicon Nitride
Transparency: Shortest λ (μm)	1.1	0.4
Transparency: Longest λ (μm)	~ 4	~ 4
Guiding layer thickness (μm)	0.05 to 0.5	0.05 to 0.7
Index Contrast (%)	140	38 (28)
Waveguide Loss (dB/cm)	1 to 1.5	0.001 to 0.5 [71], [39] (4.0) [72]
Kerr Index (m^2/W)	$\sim 4.5 \times 10^{-18}$ [116], [81]	$\sim 0.26 \times 10^{-18}$ [15]
TPA Coefficient (m/W)	$\sim 9 \times 10^{-12}$	0
Distributed Backscatter (dB/mm)	-25	-30 to -40 [67]
n_{eff} sensitivity (strip width) nm^{-1}	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-4}$
Temperature Sensitivity K^{-1}	$\sim 1.86 \times 10^{-4}$	$\sim 2.45 \times 10^{-5}$
High speed Modulators Gb/s	> 40	Not available
Integrated Photodetector GHz	> 60	Not available
Layer Stack Flexibility	Limited	Excellent

1.5 異種材料間接合

先述した SiN 以外にも、Si との異種材料間接合を行なっている研究は多数報告されている。その中からいくつか例を述べた後に、SiN/Si 接合について述べる。

1.5.1 InP/Si 接合

まずは、InP 系の化合物半導体と Si の接合に関する研究である。InP 系の化合物半導体はレーザーアクティブ光学素子に主に用いられる。一方で Si に比べウェハサイズが小さいため、製造難易度が高く、大量生産には向いていない。Si に関しては、その生産性の高さから、マッハツェンダー干渉変調器 (MZM: Mach-Zehnder-Modulator) の開発など

に用いられるが、変調効率を高くすると吸収損失が増大するという、トレードオフが存在し、Si 単体での限界が見えてきた。そこで、シリコンフォトリソグラフィの限界を打破するために、InP 系の化合物半導体と Si を異種混載した、キャリア蓄積型の MZM の開発がされた。[13]

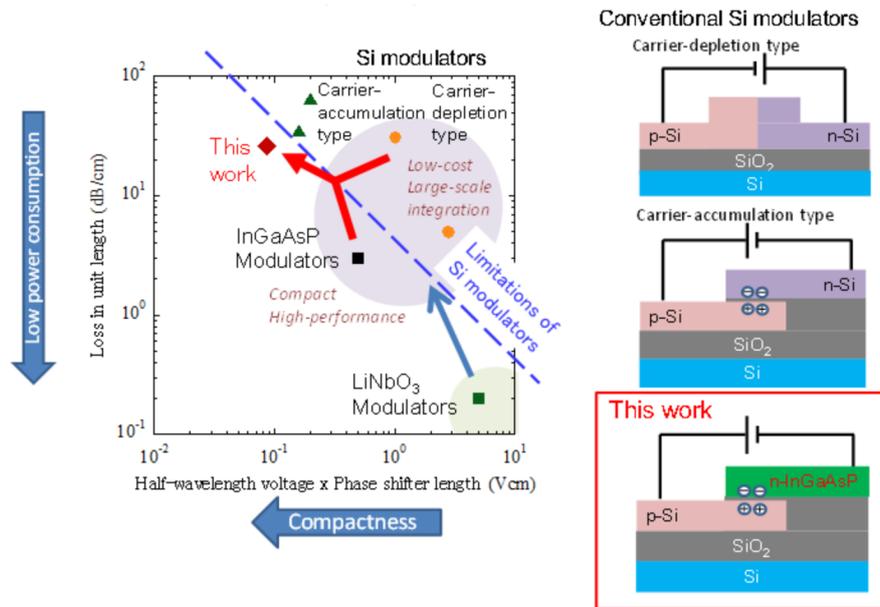


Fig.1.9: Modulation efficiency and insertion loss of Mach-Zehnder modulators (MZMs). (Nippon Telegraph and Telephone Corporation, "High-performance optical modulators on silicon platform - Integration of compound semiconductors and silicon, providing compactness, low-power consumption, and low propagation loss -", 2017 [https://group.ntt/en/newsrelease/2017/07/18/170718a.html])

この研究では、InGaAsP を用いており、各物質の組成比によってバンドギャップを制御することで、屈折率差を変化させ、吸収損失を小さくすることが可能になり、変調器の変調効率は 0.09 Vcm、透過率が 80% が達成された。また、変調速度は 32 Gbit/s であった。

1.5.2 Si/SiN 接合

次に、SiN と Si の接合に関する研究である。Si の 1 層の導波路による 2 次元光集積回路では、Si の屈折率差が大きいことにより、1 回の導波路の交差で約 15~40 dB なので、導波路の交差が数百から数千ある光集積回路では損失が大きくなる。そこでこの研究では SiN の、Si よりも CMOS 互換性が高い、また通信波長帯で二光子吸収がないという特徴に着目し、Fig.1.10 のように Si チップの上に SiN チップを配置し、光の伝搬させることを行なった。[14]

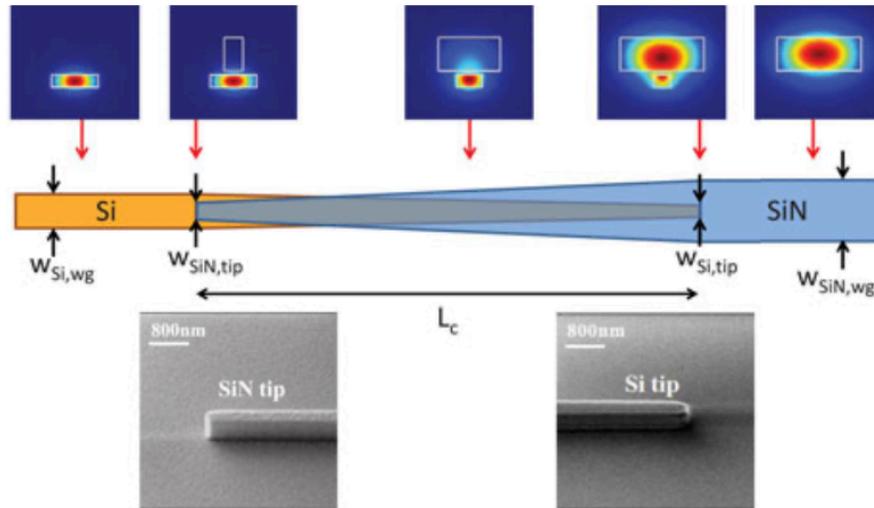


Fig.1.10: Schematic of the interlayer transition. The computed TE₀ mode at various waveguide cross-sections along the transition are shown to illustrate the mode evolution. Scanning electron micrographs (SEMs) of the waveguide tips.,(Wesley D. Sacher, *et al.*, "Multilayer Silicon Nitride-on-Silicon Integrated Photonic Platforms and Devices", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, **33**, 4, 2015.)

3D-FDTD シミュレーションを行った結果、伝搬方向に対して垂直、平行な方向の±50 nm のミスアライメントに対してそれぞれ、0.03 dB, 0.001 dB より小さい損失であり、層間不整合に対してロバスト性があることがわかった。 [14]

1.5.2.1 グレーティングカプラ

この研究では、層間の結合にはグレーティングカプラが使用されている。グレーティングカプラとは導波路に周期的に回折格子状の構造をとらせることで、光を結合するもので、ダイジングや研磨によって加工する必要がない。さらに Si のグレーティングカプラでは -0.64 ~ -0.16 dB で高い結合効率が報告されている。一方で Si のグレーティングカプラは比較的狭帯域に制限されるという欠点がある。一般的に屈折率差を下げると帯域幅が広がるが、結合効率は落ちるといったトレードオフの関係がある。そのため SiN のグレーティングカプラでは、Si よりも広帯域に動作するが、結合効率が -4.2 dB と低い [15]。そこでこの研究では、膜厚 65 nm の Si、膜厚 400 nm の SiN 両方にグレーティング構造をとり、構造の最適化を行うことで、ピーク結合効率が -1.3 dB でそこから -1 dB の帯域幅が 80 nm とピーク結合効率が -2.3 dB でそこから -1 dB の帯域幅が 110 nm であるグレーティングカプラが実証された。 [14]

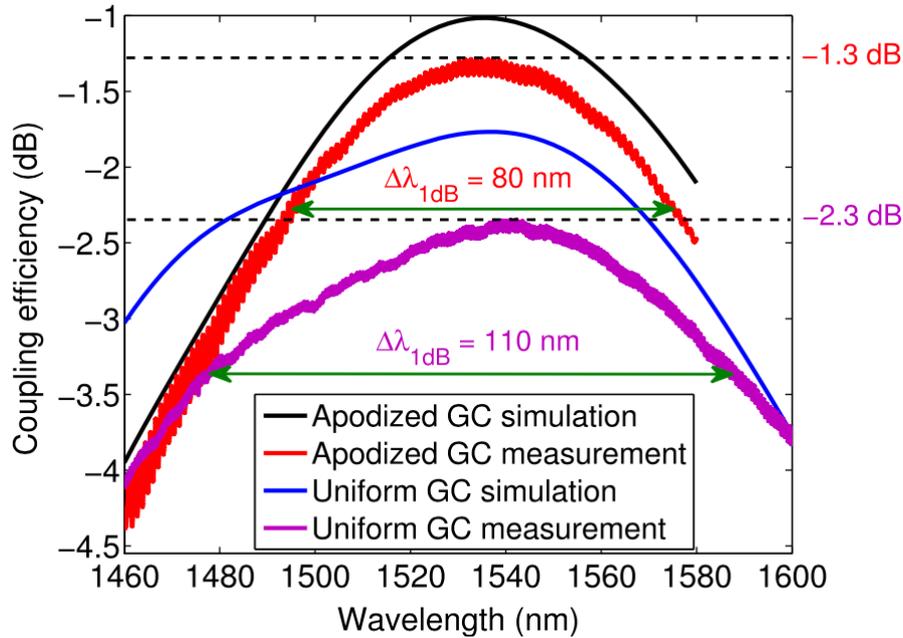


Fig. 1.11: Measured and simulated coupling efficiency spectra for the bi-level Si_3N_4 -on-SOI apodized and uniform grating couplers (GCs). The figure is annotated with the peak coupling efficiencies and 1-dB bandwidths of the measured data.,(Wesley D. Sacher, *et al.*, "Multilayer Silicon Nitride-on-Silicon Integrated Photonic Platforms and Devices", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, **33**, 4, 2015.)

このようにこの研究ではミスアライメントに強く、結合効率も良い結果が得られたが、製造難易度が高いことと、膜厚が制限され光周波数コムが発生のためには不適であるので光周波数コム光源を用いた光集積回路の実現のためには適さないと考えられる。

1.5.3 エッジカプラ

エッジカプラとは導波路-導波路、光ファイバ-導波路間を端面同士を近接させて接合を行う方法である。エッジカプラの性能を評価する際には、結合効率、フットプリント、動作帯域幅、製造誤差への耐性、およびミスアライメントの許容範囲などのパラメータが存在する。

1.5.3.1 逆テーパ構造

逆テーパ構造とは、導波路幅がチップの結合部に向けて広がっていく構造のことである。通常、光は狭い導波路幅においては十分に閉じ込めることができず、モードサイズが拡大してしまう。そこで、ファイバからの光を逆テーパ構造をとっている導波路に沿って伝搬させることで、損失を低減することができる。逆テーパ構造においてモード伝搬損失

は、テーパの長さ、テーパ先端の幅、テーパの傾斜のなど複数の要因に依存し、Fig.1.12aに示すように十分にテーパ長が長くなると、スポットサイズが小さくなり、光が導波路に閉じ込められ結合効率の変化は緩やかになる。また、テーパの傾斜が十分に緩やかであれば、高次モードを励起することなく、モードは断熱的に伝搬することができる。このように逆テーパ構造は構造の単純さから製造が容易であり、製造誤差に対する許容範囲が広い。一方で、フットプリントが大きいことと、結合効率がグレーティングカップラなどの他の結合方法と比較して低いことが欠点である。

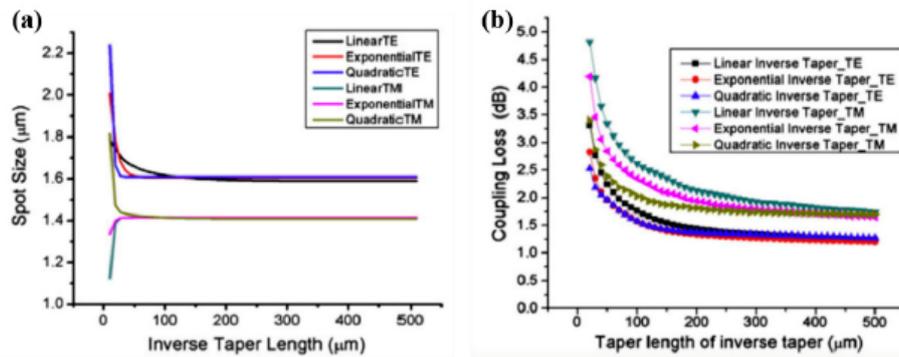


Fig. 1.12: The relationship between inverse taper length and (a) spot size and (b) coupling loss. (Xin Mu, Sailong Wu, Lirong Cheng, H.Y. Fu, "Edge Couplers in Silicon Photonic Integrated Circuits: A Review", Applied Sciences Open Access **10**, 41, 2020)

1.6 本研究の目的

光集積回路を用いて、光通信を行うことで従来の電気回路よりも高速・広帯域・省エネな大容量通信ができると期待されるため、近年、光集積回路が注目されている。光集積回路の材料として Si を用いることに多くの利点が挙げられるが、実際に Si を用いた光集積回路で光通信を行うにあたり、光周波数コム光源を異種材料で作製し、チップ間接合を行うことで送信器の小型化が見込まれる。しかし、そのままの接合部の形状では実効屈折率が異なることにより、インピーダンスの不整合により反射や散乱が起きる。さらに、モードの形状が異なるためチップ間で損失が大きくなってしまふことは避けられない。また、Si, SiN のチップの膜厚はプロセスの関係上決まっている。伝搬損失についても考慮すると、導波路幅もある程度決められてくる。そのため、光源からの光を高効率に Si チップへ導波させるために、様々な接合法や構造が検討されている。本論文ではその中でも製造誤差に強い逆テーパ構造を選択し、接合時の結合効率等を測定した、その後、逆テーパ構造により各チップの実効屈折率とモードオーバーラップが一致するように最適化を行って接合部の結合効率などの解析をした結果を基に、理論的検討を行った。

第2章 理論

光の伝搬理論について論じる.

2.1 光伝搬理論

2.1.1 マクスウェル方程式

光は電磁波の一部であり, 伝搬とは電磁波の位置が時間的に変化することである. よって, 電磁界の時間・空間変化を求めることができれば, 光の伝搬を理解することができる. つまり, 電場 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ と磁場 $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ の二つのベクトル場, すなわち六つのスカラー関数によって光の伝搬は記述される. これらの関数はマクスウェル方程式を満たす. まず, 以下が自由空間のマクスウェル方程式である.

$$\text{rot}\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (2.1.1)$$

$$\text{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (2.1.2)$$

$$\text{div}\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (2.1.3)$$

$$\text{div}\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (2.1.4)$$

ここで, ε は媒質中の誘電率, μ_0 は自由空間の透磁率を表している. \mathbf{E} と \mathbf{H} がこのマクスウェル方程式を満たすための必要条件は, これらの成分が以下で示される波動方程式を満たすことである.

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1.5)$$

ここで u は E, H のそれぞれの成分を表すスカラー関数であり, c は媒質中での速度で光速 c_0 を用いて $c = c_0/n$ である. n は次のように表され, これは屈折率が誘電定数の平方根であることを意味する.

$$n = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^{1/2} \quad (2.1.6)$$

さらに、マクスウェル方程式と波動方程式はその線形性から重ね合わせの原理を適用することができ、電場と磁場がこの式の解である時、和も解となる。また、媒質中において、電束密度 $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ と磁束密度 $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$, \mathbf{E} , \mathbf{H} は以下のような関係にある。 [17]

$$\text{rot}\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.1.7)$$

$$\text{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1.8)$$

$$\text{div}\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (2.1.9)$$

$$\text{div}\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (2.1.10)$$

2.1.2 境界条件

$\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{D}, \mathbf{B}$ は全て \mathbf{r} に対して連続な関数であり、異なる媒質の境界において、 \mathbf{E}, \mathbf{H} の接線方向成分、 \mathbf{D}, \mathbf{B} の垂直方向成分は、それぞれの媒質内で連続である。

2.1.3 ポインティングベクトル

単位面積を単位時間値に通過する電磁気的エネルギー、つまりエネルギー流密度をポインティングベクトルといい、以下の式で表される。

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (2.1.11)$$

2.1.4 スラブ導波路の電界モード

コアがクラッドで挟まれた薄膜型の導波路であるスラブ導波路の電界モードを求める。ここでは、 y 軸、 z 軸に無限に広がるスラブ導波路を z 方向に光が伝搬することを考え、進行波の条件を以下の式のようにする。

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \exp i(\omega t - \beta z) \quad (2.1.12)$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} \exp i(\omega t - \beta z) \quad (2.1.13)$$

ここで、 β は進行波と z 軸が成す角度 θ と波数 k を用いて $\beta = k \cos \theta$ で与えられ、伝搬定数と呼ぶ。 β は各モードごとに異なる値を持つ。 これらを式 (2.1.1), (2.1.2) に代入し、スラブ導波路の構造条件 $\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} = 0, \frac{\partial}{\partial t} = 0$ を考えると以下の 6 式が得られる。

$$i\beta H_y = i\omega \varepsilon E_x \quad (2.1.14)$$

$$-i\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = i\omega \varepsilon E_y \quad (2.1.15)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = i\omega \varepsilon E_z \quad (2.1.16)$$

$$i\beta E_y = -i\omega \mu H_x \quad (2.1.17)$$

$$-i\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -i\omega \mu H_y \quad (2.1.18)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -i\omega \mu H_z \quad (2.1.19)$$

この 6 式は式 (2.1.15), (2.1.17), (2.1.19) と式 (2.1.14), (2.1.16), (2.1.18) に分離することができる。 前者を TE モード、後者を TM モードという。

$$\text{TE モード : } \mathbf{E}(0, E_y, 0), \mathbf{H}(H_x, 0, H_z)$$

$$\text{TM モード : } \mathbf{E}(E_x, 0, E_z), \mathbf{H}(0, H_y, 0)$$

2.1.4.1 TE モード

ここでは、TE モードの伝搬定数 β を求めることを考える。 まず、TE モードの導波路に対する波動方程式を求める。 式 ([?, ?, ?]) は以下の式にまとめられる。

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (\omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2) E_y = 0 \quad (2.1.20)$$

ここに $\nu = 1/\sqrt{\varepsilon\mu}$, $k = \omega/\nu = 2\pi/\lambda = n\omega/c$, $k_0 = \omega/c$ を用いると以下の式のようになる。

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (k_0^2 n^2 - \beta^2) E_y = 0 \quad (2.1.21)$$

ここで、全反射の条件を考慮すれば、 $k_0 n_2 < \beta < k_0 n_1$ なので、コアの膜厚を a とすると、以下のようになる。

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (k_0^2 n_1^2 - \beta^2) E_y = 0 & (x \leq |a|) \\ \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} - (\beta^2 - k_0^2 n_2^2) E_y = 0 & (|a| \leq x) \end{cases} \quad (2.1.22)$$

さらに,

$$\begin{cases} \kappa^2 \equiv (k_0^2 n_1^2 - \beta^2) > 0 \\ \gamma^2 \equiv (\beta^2 - k_0^2 n_2^2) > 0 \end{cases}$$

を用いると以下の式が得られる.

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = -\kappa^2 E_y & (x \leq |a|) \\ \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \gamma^2 E_y & (|a| \leq x) \end{cases} \quad (2.1.23)$$

ここで, 境界条件を考えると, 解は以下のようになる.

$$\begin{cases} E_y = A_e \cos(\kappa x) & (x \leq |a|) \\ E_y = A_e \cos(\kappa a) \exp[-\gamma(|x| - a)] & (|a| \leq x) \end{cases} \quad (2.1.24)$$

$$\begin{cases} E_y = A_e \sin(\kappa x) & (x \leq |a|) \\ E_y = \frac{x}{|x|} A_e \sin(\kappa a) \exp[-\gamma(|x| - a)] & (|a| \leq x) \end{cases} \quad (2.1.25)$$

この時, 式 (2.1.24) の組みを TE 偶数次モードといい, 式 (2.1.25) の組みを TE 奇数次モードという. A_e は振幅を表す実数である.

ここで TE 偶数次モードに注目し, 固有方程式を求める. 境界条件から, コアとクラッドの境界で H_z 式が連続であるので, (2.1.19) を式 (2.1.24) に代入すると, 以下の関係式がもとまる.

$$\tan(\kappa a) = \frac{\gamma a}{\kappa a} \quad (2.1.26)$$

これが, 固有方程式である. さらに, κ, γ を代入すると以下の式が求まる.

$$(\kappa a)^2 + (\gamma a)^2 = V^2 \quad (2.1.27)$$

$$\begin{cases} V = k_0 n_1 a \sqrt{2\Delta} \\ \Delta = \frac{(n_1^2 - n_2^2)}{2n_1^2} \simeq \frac{n_1 - n_2}{n_1} \end{cases} \quad (2.1.28)$$

ここで, V パラメータは規格化周波数とよび, この値によってモードの数が決まる. また, Δ はコアとクラッドの比屈折率差であり, それぞれの屈折率に大きな差がない場合, 上式の近似が成り立つ. 式 (2.1.26), (2.1.28) より, TE 偶数次モードの固有モードを求めることができる. TE 奇数次モードについても同様に議論することで固有方程式は以下のようになる.

$$\tan(\kappa a) = -\frac{\kappa a}{\gamma a} \quad (2.1.29)$$

$X = \kappa a, Y = \gamma a$ として, Fig.[2.1] のように $X^2 + Y^2 = V^2$ との交点から伝搬定数 β が求められる.

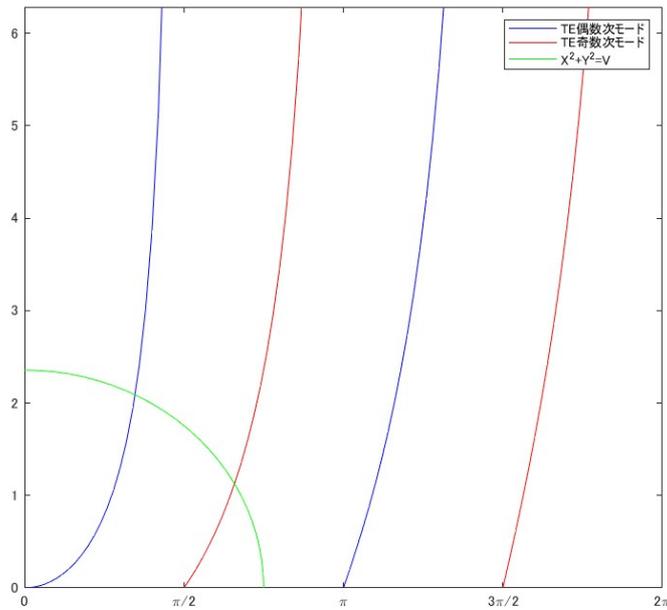


Fig. 2.1: TE モードの固有モード

2.1.4.2 TM モード

まず, TM モードの波動方程式は以下の式のようになる.

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + (\omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2) H_y = 0 \quad (2.1.30)$$

これは TE モードの波動方程式 (2.1.20) と同じ形をしているので, TE モードと同様の議論によって以下のように偶数次モードと奇数次モードの式が求まる.

$$\text{TM 偶数次モード} : \begin{cases} H_y = A_e \cos(\kappa x) & (x \leq |a|) \\ H_y = A_e \cos(\kappa a) \exp[-\gamma(|x| - a)] & (|a| \leq x) \end{cases} \quad (2.1.31)$$

$$\text{TM 奇数次モード} : \begin{cases} H_y = A_e \sin(\kappa x) & (x \leq |a|) \\ H_y = \frac{x}{|x|} A_e \sin(\kappa a) \exp[-\gamma(|x| - a)] & (|a| \leq x) \end{cases} \quad (2.1.32)$$

TE モードの時同様に偶数次モードに注目し、式 (2.1.16) を式 (2.1.31) に代入すると以下の関係が求まる。

$$\tan(\kappa a) = \frac{\varepsilon_1 \gamma a}{\varepsilon_2 \kappa a} \quad (2.1.33)$$

ここで、式 (2.1.6) をこの式に代入することで固有方程式が求まる。

$$\tan(\kappa a) = \frac{n_1^2 \gamma a}{n_2^2 \kappa a} \quad (2.1.34)$$

この式と、式 (2.1.26) から固有モードを求めることができる。同様にして、TM 奇数次モードの固有方程式は以下のようなになる。

$$\tan(\kappa a) = -\frac{n_2^2 \kappa a}{n_1^2 \gamma a} \quad (2.1.35)$$

2.1.5 NA(開口数)

光ファイバには屈折率階段型ファイバというものがある。屈折率階段型ファイバはコアとクラッドが急激に変化しているファイバである。コアの屈折率を n_1 クラッドの屈折率を n_2 、ファイバの外側のバイシルの屈折率を n 、ファイバの受光角を θ_a 、ファイバ軸に対して臨界角の補角を θ_{core} とすると、 θ_a, θ_{core} には以下のような関係がある。

$$n \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_{core} \quad (2.1.36)$$

また、 θ_{core} は以下のように表される。

$$n_1 \sin(90^\circ - \theta_{core}) = n_2 \quad (2.1.37)$$

この2式から θ_a は以下のように表すことができる。

$$NA = n \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.1.38)$$

この時、NA を開口数と呼ぶ。この関係から、先述した、 V パラメータは以下のようにも表される。

$$V = k_0 a NA \quad (2.1.39)$$

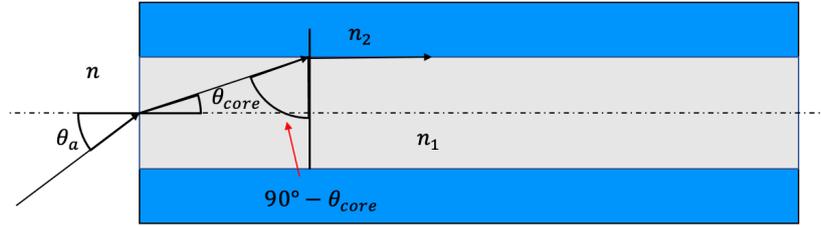


Fig. 2.2: ファイバ内の伝播モード

2.1.6 フラウンホーファー回折

フラウンホーファー回折は開口の光透過理論である。フラウンホーファー近似は、開口と観察面との伝播距離 d が十分に長く、フレネル数 N_F が以下のような場合に成り立つ。

$$N_F = \frac{(D/2)^2}{\lambda d} \ll 1 \quad (2.1.40)$$

ここで D は開口径である。入射波が z 方向に進む強度 I の平面波である時、 $z = 0, d$ での複素振幅 $f(x, y), z(x, y)$ は以下のように表される。

$$f(x, y) = I^{1/2} p(x, y) \quad (2.1.41)$$

$$g(x, y) \approx I^{1/2} h_0 P\left(\frac{x}{\lambda d}, \frac{y}{\lambda d}\right) \quad (2.1.42)$$

ここで、 h_0 は以下のように表され

$$h_0 = \frac{j}{\lambda d} \exp(-jkd) \quad (2.1.43)$$

$p(x, y)$ は以下で示される開口関数である。

$$p(x, y) = \begin{cases} 1 & |x|, |y| < D/2 \\ 0 & |x|, |y| > D/2 \end{cases} \quad (2.1.44)$$

また、 $P(\nu_x, \nu_y)$ は $p(x, y)$ のフーリエ変換で以下のように表される。

$$P(\nu_x, \nu_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} p(x, y) \exp[j2\pi(\nu_x x + \nu_y y)] dx dy \quad (2.1.45)$$

以上からフラウンホーファー回折による回折像は以下の式で与えられる。

$$I(x, y) = \frac{I}{(\lambda d)^2} \left| P\left(\frac{x}{\lambda d}, \frac{y}{\lambda d}\right) \right|^2 \quad (2.1.46)$$

ここで直径 D の円形開口である時は第一種ベッセル関数 j_1 を落ちいて、さらに以下のように回折像が与えられる。

$$I(x, y) = I_o \left[\frac{2J_1(\pi D \rho / \lambda d)}{\pi D \rho / \lambda d} \right]^2 \quad (2.1.47)$$

ここで、 I_o はピーク強度で、 $\rho^2 = x^2 + y^2$ である。また、この時円形な回折像をエアリー像 (Airy pattern) と呼ばれる。さらに中央の円盤をエアリーディスク (Airy disk) と呼び、その半径は以下のようなになる。

$$\rho_r = 1.22 \frac{\lambda d}{nD} \quad (2.1.48)$$

また、これよりエアリーディスクが z 軸となす角度 θ は次のようになる。

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{nD} \quad (2.1.49)$$

2.1.7 スポット半径

円形開口の直後に焦点距離 f 、直径 D のレンズがあり、集光される場合、フラウンホーファー回折を適用すると、スポットの強度分布 $I(x, y)$ とスポット半径 w は以下のようなになる。

$$I(x, y) = I_o \left[\frac{2J_1(\pi D \rho / \lambda f)}{\pi D \rho / \lambda f} \right]^2 \quad (2.1.50)$$

$$w = 1.22 \frac{\lambda f}{nD} = 1.22 \frac{\lambda F}{n} = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad (2.1.51)$$

2.1.8 パワーの反射率と透過率

ある屈折率 n_1 の物質内を伝搬する光が屈折率 n_2 である物質ににゅう y さするとき、反射係数 r 、透過係数 t は光の複素振幅の比である。反射率 R と透過率 T は、境界面に垂直方向の入射波のパワーに対する比である。ここで、反射波と入射波は同じ物質内を伝播し、境界面となす角度は等しいので反射率は以下のようなになる。

$$R = |r|^2 \quad (2.1.52)$$

また、パワー保存則より透過率と反射率の関係は以下のようなになる。

$$T = 1 - R \quad (2.1.53)$$

さらに, R は n_1, n_2 を用いて以下のようになる.

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2.1.54)$$

第3章

SiN/Si 接合実験

3.1 実験系の構築

実験系のセットアップは以下の通りである。



Fig. 3.1: measurement setup

- 調芯系の構築

本研究ではアライメントに携わる機器の選定，治具の作製から行った．以下がその調芯系の設計図である．

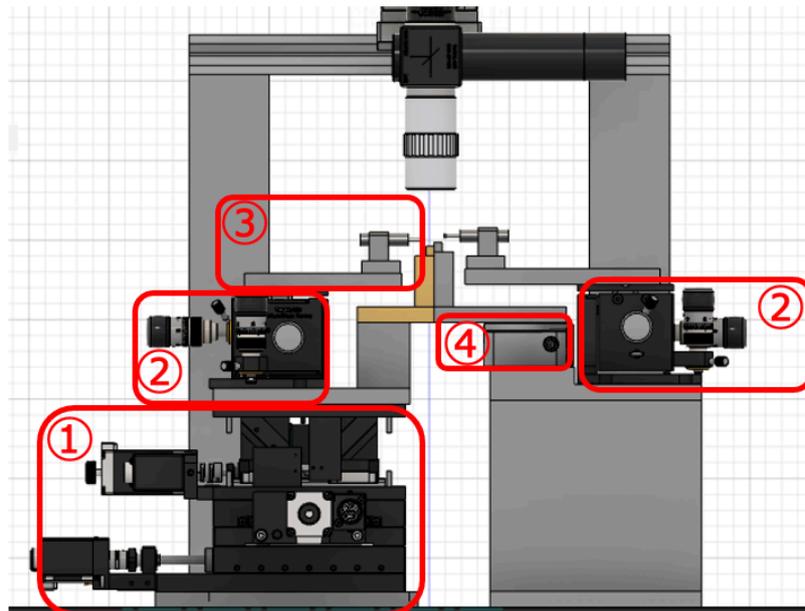


Fig. 3.2: alignment system

- ① シグマ光機株式会社の FS-1050PX を 2 台，FS-1005PZ を組み合わせた 3 軸自動移動ステージである．各軸方向に移動分解能 10 nm を持ち，高い位置再現性，位置保持性を持つ．この 3 軸ステージにより SiN/Si チップ間のアライメントを行った．

- ② 手動 3 軸ステージ (ソーラボジャパン株式会社,MBT616D) であり, 集光モジュール/SiN チップ,Si/集光モジュール間のアライメントを行った.
- ③ 特注した集光モジュール (株式会社オプトクエスト) である.
 使用波長 1260-1630 nm
 挿入損失 ≤ 0.9 dB
 反射減衰量 ≥ 50 dB
 集光径 2.8 μ m
 集光位置 モジュール端から 200 μ m
 ファイバ SMF, ϕ 3.0 mm, $L = 1.0$ m
 コネクタ SC/SPC
- ④ 自動回転ステージ (シグマ光機株式会社, OSMS40-YAW) であり, 角度分解能 0.0025° を持ち, チップ間角度を調整した. また, この自動回転ステージに取り付けたチップ台を回転させ, 調芯系から取り除くことができようにし, この一つの調芯系のみでチップ幅の違うチップをそれぞれのみでのアライメント, 2つのチップを接合を行うことができるようにした.

以上のように各ステージを導入することで, 集光モジュール/SiN, SiN/Si,Si/集光モジュール間のアライメントをそれぞれ独立して行えることがこの調芯系の特徴である.

- 高性能波長可変レーザー光源 (TSL-510)

本研究ではレーザーには TSL-510(株式会社サンテック) を用いた. TSL-510 の性能には以下のような特徴があり, 各チップの透過率の波長依存性についても観察した.

- 130 nm 波長可変 (1260-1680 nm の範囲から選択)
- 100 nm/sec 波長スイープ
- 全域モードホップフリースペクトル線幅可変 (コヒーレンスコントロール)
- 波長分解能 < 1 pm (Fine tuning)

- パワーメータ (Power Meter:PWM)

チップからの透過パワーを PWM で読み取り, PWM からの出力を DAQ によって読み込むことで, ある波長における透過パワーを知ることができる. これにより, 波長とチップの透過率の関係を求めた.

各機器の制御は自作の LabVIEW プログラムを用いて行った.

3.2 SiN,Si チップ



Fig. 3.3: (a)SiN チップ,(b),Si チップに

3.3 実験方法

ここでは SiN,Si の結合効率, SiN/Si 接合時の結合効率, ミスアライメントと結合効率の関係を実験方法を実験方法を述べる.

3.3.1 SiN,Si の透過率測定

まず初めに Fig.3.4a のように片側のチップ台を回転ステージにて調芯系から取り除き, 各チップの透過率を測定した. この際, 手動回転ステージを用い, Fig.3.4b のように可視光でおおよそのアライメントを行い, その後 1550nm の光を通し, PWM の値を見ながらアライメントを行った. ただし, SiN は可視光を透過するため, 入射側と反対側に可視光が確認できるが, Si は可視光を透過しないことに注意した. その後, 偏波コントローラで偏波を調整し 1550-1600nm まで波長をシフトし, 各チップの透過率を得た.

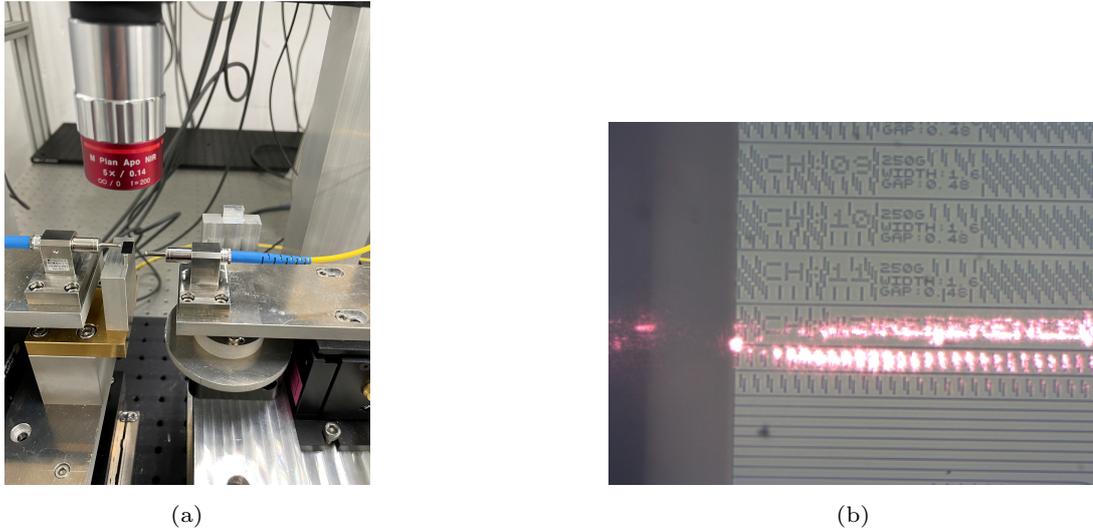


Fig. 3.4: (a) チップ透過率測定の様子,(b),SiN に可視光を通して様子

3.3.2 SiN/Si 接合時の結合効率測定

次に SiN/Si 接合時の結合効率の測定を行った。先ほど Si のアライメントを済ました状態で、回転ステージを初期位置に戻し、SiN をチップ台に配置した。回転ステージによって Si, SiN の端面が平行になるように調節した後に、SiN の導波路右端面のアライメントを手動 3 軸ステージを用いて行った。

その後、自動 3 軸ステージで各チップ間のギャップを最小になるように近づけた。その様子を Fig.3.5 に示す。

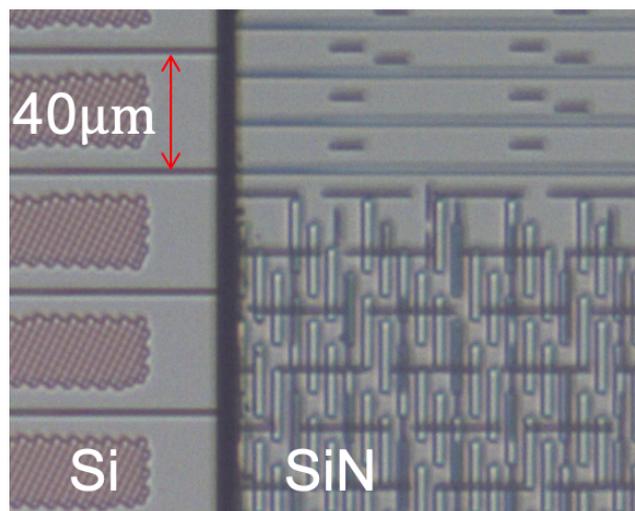


Fig. 3.5: SiN/Si 接合の様子

その後、偏波コントローラで偏波を調整し 1550-1600nm まで波長をシフトし、SiN/Si 接合時の透過率を得た。

3.3.3 各軸方向へのミスアライメントと結合効率の関係の測定

次に各軸方向へのミスアライメントと結合効率の関係の測定を行った。SiN/Si 接合時の結合効率の測定を行った状態から、 x, y 要項へのミスアライメント x_{mis}, y_{mis} を $|x_{mis}|, |y_{mis}| < 2\mu m$ までを 100nm ごと、 $2\mu m < |x_{mis}|, |y_{mis}| < 5\mu m$ までを 1 μm ごとに結合効率を測定した。

その後、 z 方向のミスアライメントはチップ間ギャップが大きくなる方向に 2 μm までを 100nm ごとに、2-5 μm までを 1 μm ごとに結合効率を測定した。

3.3.4 インデックスマッチング溶液を用いた結合効率、各軸方向へのミスアライメントと結合効率の関係の測定

次に一度自動 3 軸ステージを用いて 2 つのチップをアライメント軸からずれないように離したのちに、SiN 導波路に可視光を入射させ、出射側にインデックスマッチング溶液を少量つけた。その後、[3.3.2],[3.3.3] の実験と同様の手順で SiN/Si の結合効率、各軸方向へのミスアライメントと結合効率の関係を求めた。

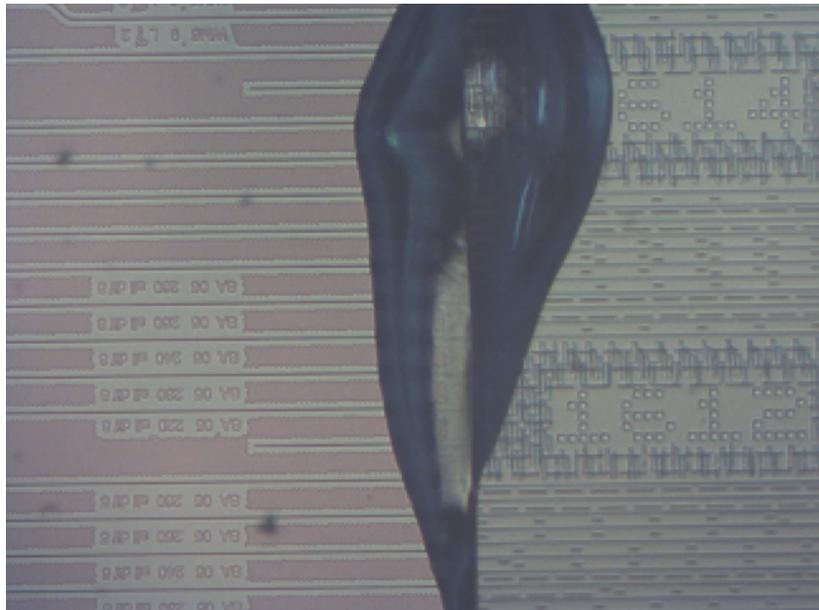


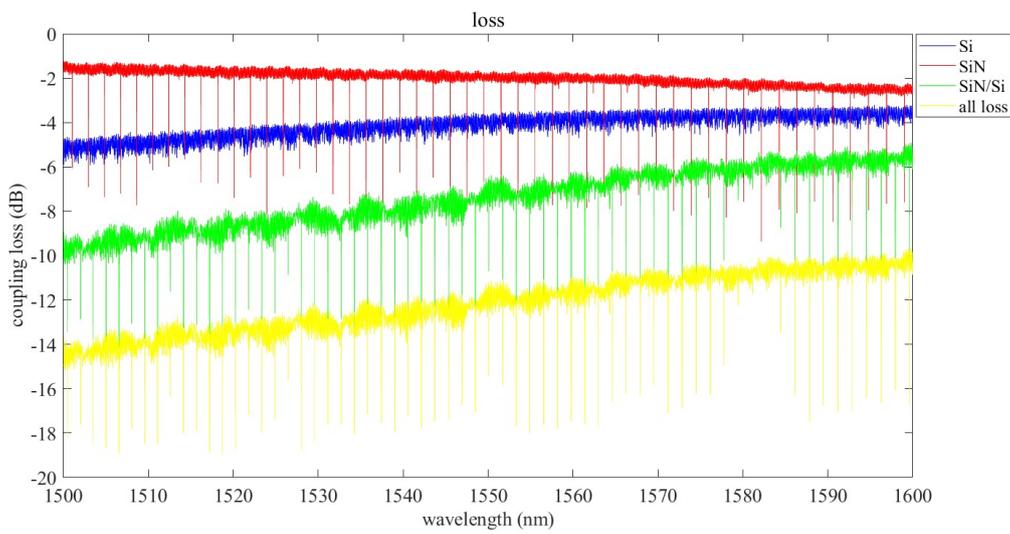
Fig. 3.6: インデックスマッチング用液を付着した様子

第4章

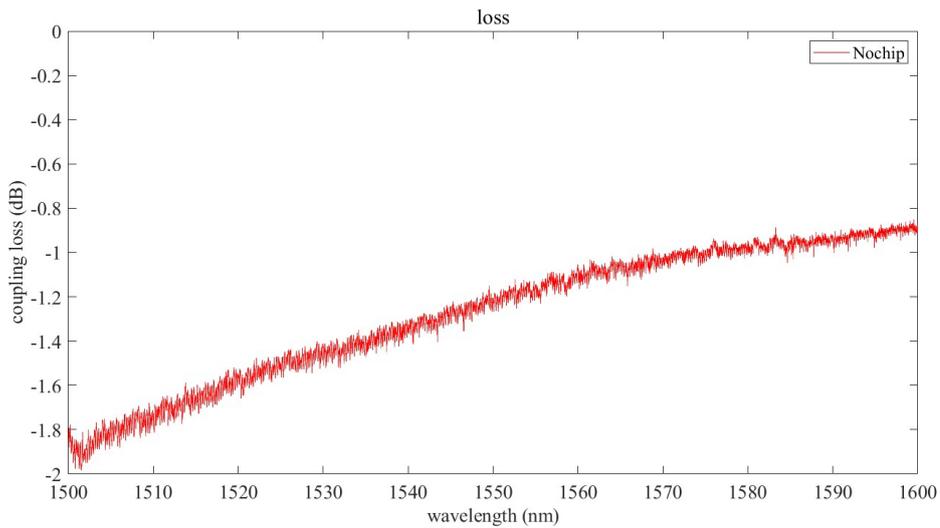
実験結果

4.1 SiN,Si の透過率, SiN/Si の結合効率

Fig.4.1 に SiN,Si の透過率, SiN/Si の結合効率, 集光モジュールの透過率の測定結果を示す.



(a) 透過率, 結合効率測定



(b) 集光モジュールの透過率

Fig. 4.1

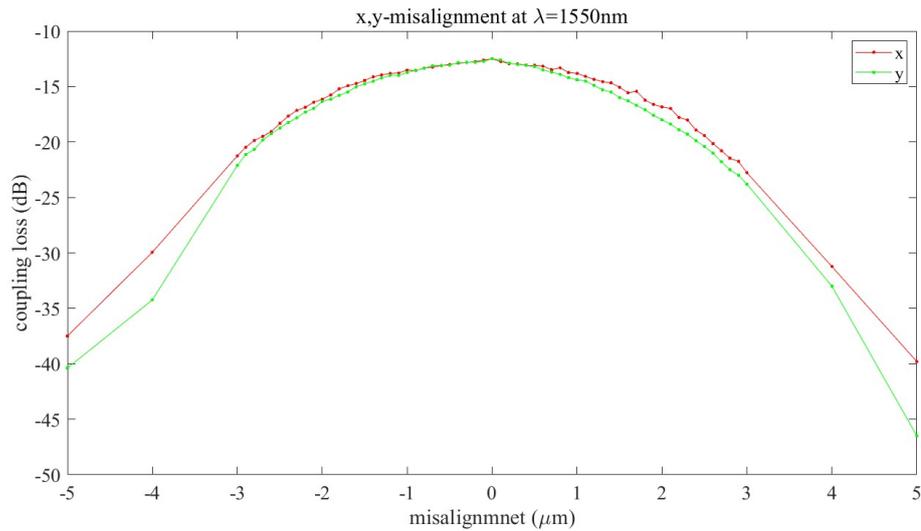
PWM での測定結果とレーザーから偏波コントローラーまでの損失が $-1.6dB$ であったことから SiN,Si のチップ両端での損失が入力波長 $1550nm$ においてそれぞれ $-1.6dB, 4.7dB$ であることがわかった. またこのことと, SiN/Si 接合時の PWM の測定結果が $-12.6dB$ であったことより, SiN/Si の結合効率は $-7.85dB, (16.4\%)$ であることがわかった.

Si,SiN/Si については, 長波長側で損失が小さくなっていることがわかる. これは Fig.4.1b に示すように, 集光モジュールの特性によるものと考えられる.

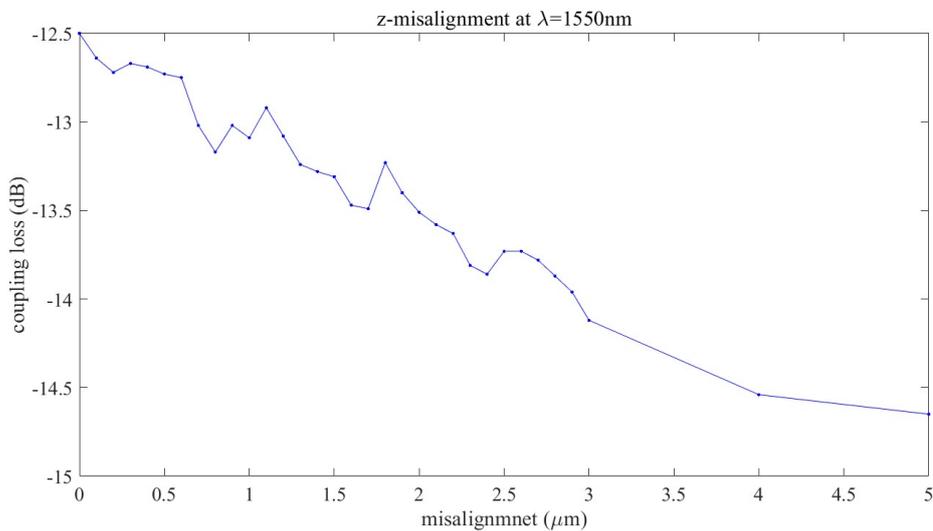
4.2 各軸方向へのミスアライメントと結合効率の関係の測定

4.2.1 シミュレーション結果との比較

Fig.4.2 に x, y, z 方向へのミスアライメントと結合効率の関係を示す。



(a) x, y 方向へのミスアライメントと結合効率の関係



(b) z 方向へのミスアライメントと結合効率の関係

Fig. 4.2

x, y のグラフの概形は非常に似ており、このことから、本実験におけるチップ間距離ではチップのモード系はおおよそ円形であると考えられる。また、 z のグラフに関しては小

さな値の上げ下げを繰り返しながら結合効率が減少していることがわかる。これは入力波長が 1550nm であることから導波路端面同士でファブリペロー共振が発生したによるものと考えられる。

ここで、fig.4.3 にチップ間に空気層はない理想的な状態でのシミュレーションと実験結果との比較を示す。

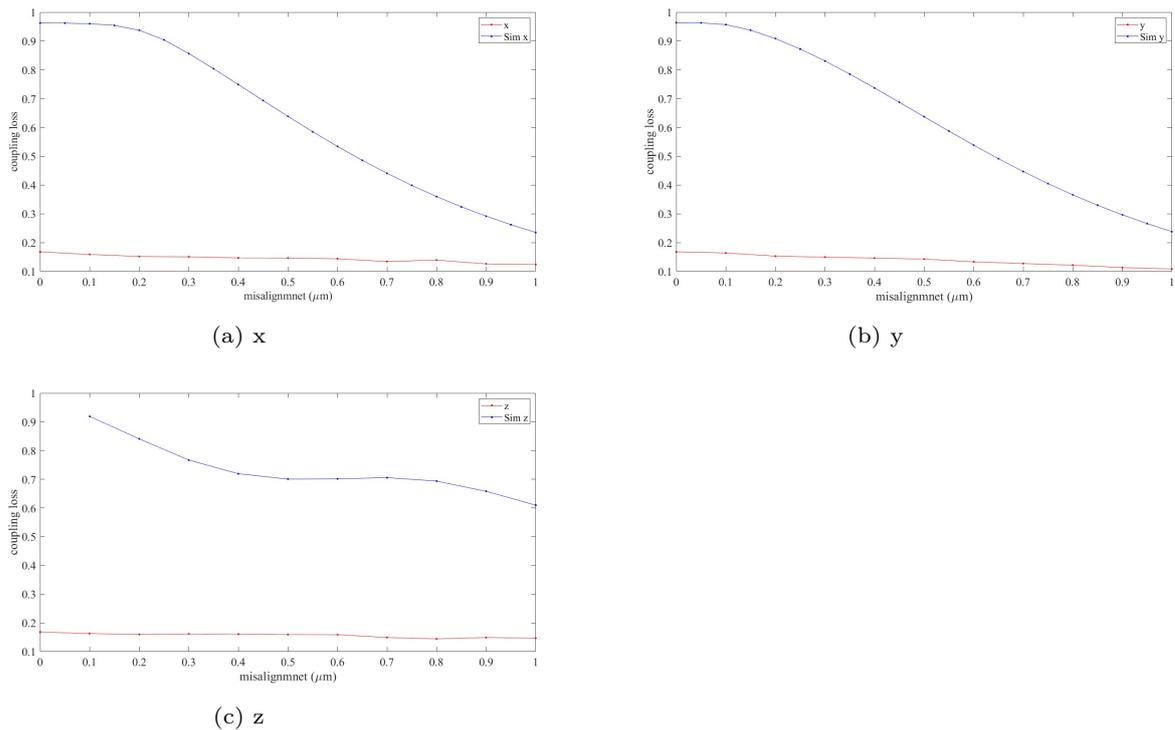


Fig. 4.3: x, y, z 方向へのミスアライメントと結合効率の関係のシミュレーション結果との比較

これより、 x, y, z いずれについてもシミュレーション結果よりも大幅に下回る結合効率であることがわかった。これはダイシング加工の影響などにより、チップ間のギャップが大きくなり、空気層が生成され結合効率が低下したものと考えられる。また、そのほかにも導波路端面における製造誤差により、レーザーが集光しきれていないことも考えられる。そこで、導波路端面を開口とし、導波路端面直後にレンズがあり、フラウンホーファー回折を仮定する。Fig.3.5 から、伝播距離 d を $7.37\mu\text{m}$ とし、 x または y のグラフから半値全幅 (Full Width at Half Maximum:FWHM) を求め、それを導波路からの光のスポット半径 w とし NA を求め、導波路端面の集光能力について検討する。

4.2.2 NA の検討

今回は x, y のミスアライメントに対するグラフが概ね等しく、後者の方がより、ミスアライメントに対する変化が大きいため y 方向のミスアライメントと結合効率の関係を用いて考える。以下に、チップ間のギャップが $7.8\mu\text{m}$ とした起きのシミュレーション結果との比較と FWHM を求めるグラフを示す。

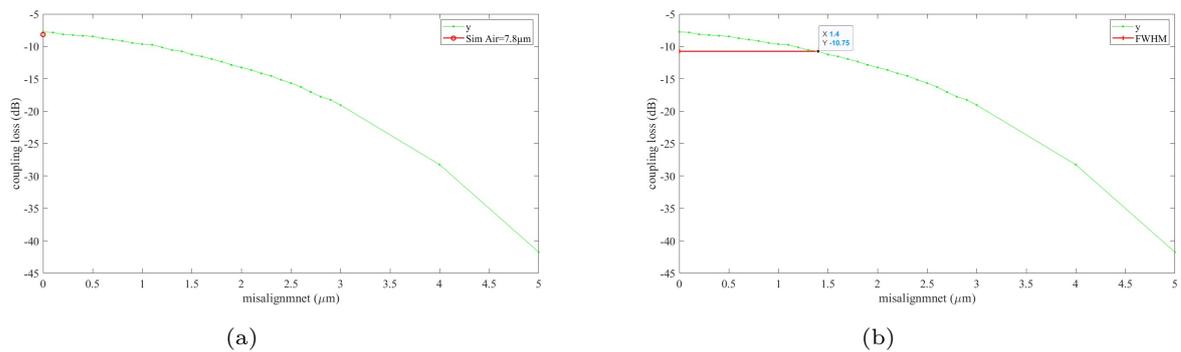


Fig. 4.4: (a) 空気層 $7.8\mu\text{m}$ のシミュレーション結果,(b): y 方向の FWHM

Fig.4.4a から実験結果での結合効率が -7.85dB であったのに対し、シミュレーションでは -8.16 であり、概ね結果は一致しており、チップ間ギャップ $7.37\mu\text{m}$ は確からしい値であると言える。Fig.4.4b より、 $w_y = \text{FWHM} = 1.4\mu\text{m}$ であることがわかった。ここで、レーザー波長が 1550nm なので、式 (2.1.51) から NA が次のように求められる。

$$NA = 0.61 \frac{\lambda}{w_y} = 0.68$$

さらに、ここで伝播距離が $7.37\mu\text{m}$ であり、これがレンズの焦点距離とすると、式 (2.1.51) より、開口径 D は以下のように求められた。

$$D = \frac{1.22\lambda f}{nw} = 9.9\mu\text{m}$$

こちらの値はチップ膜厚を考えると非常に大きな値に合っている。これより、実際の Si チップの位置は焦点距離よりも遠方に存在し、光が拡散してしまっているのではないかと考えられる。

4.3 インデックスマッチング溶液使用時の結合効率の測定

4.3.1 インデックスマッチング溶液使用時と不使用時の比較

以下にチップ間にインデックスマッチング溶液を付着させた際の結合効率の測定の結果を示す。

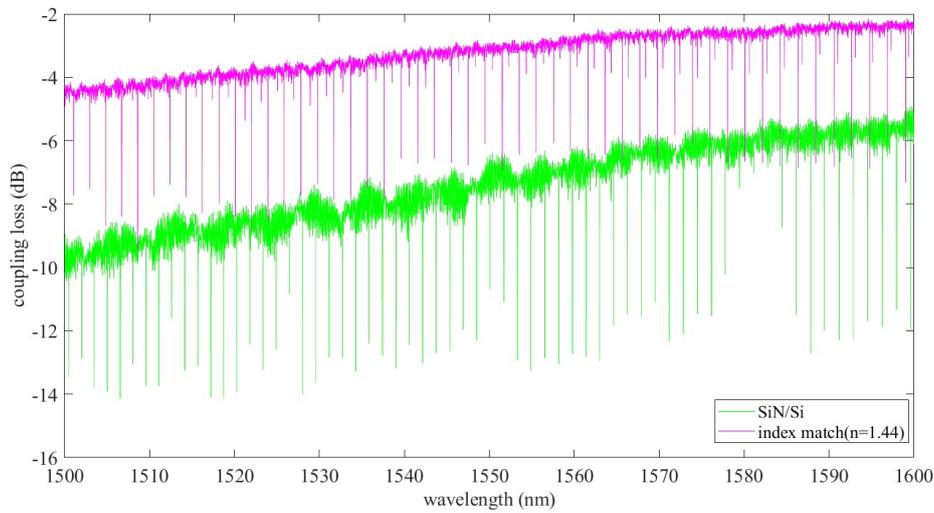


Fig. 4.5: インデックスマッチング溶液を付着させた際の結合効率

これにより、インデックスマッチング溶液を付着時に結合効率が -4.35dB という結果が得られた。4.1 節で得られた SiN/Si の結合効率が -7.85dB だったので、結合効率は 3.5dB 上昇していることがわかった。

インデックスマッチング溶液の使用によるパワーの増強を考えれば、インデックスマッチング溶液の屈折率 $n_{index} = 1.44$ なので、結合効率は $10 \log(1.44) = 1.584\text{dB}$ の上昇が見込まれる。実験結果ではこれよりも結合効率は上昇している。これは各境界面での反射の低減が考えられる。式 (2.1.53), (2.1.54) から、間に空気層がある場合の SiN, Si チップの各導波路端面における透過率 T_{SiN}, T_{Si} は以下のようなになる

$$T_{SiN} = 10 \log \left(1 - \left(\frac{1.99-1}{1.99+1} \right)^2 \right) = -0.5\text{dB}$$

$$T_{Si} = 10 \log \left(1 - \left(\frac{3.45-1}{3.45+1} \right)^2 \right) = -1.57\text{dB}$$

各チップ導波路端面における実行屈折率を考慮すると、インデックスマッチング溶液によりこの反射による損失が 0 になるので合計で、 3.654dB の結合効率の上昇が見込まれる。

以上よりインデックスマッチング溶液を付着させることで、導波路端面での反射を低減し、レーザーパワーを維持することで十分に結合効率を上昇させることができた。

4.4 インデックスマッチング溶液使用時の各軸方向への位置ズレと結合効率の測定

4.4.1 インデックスマッチング溶液不使用時との比較

以下の Fig.4.6 にインデックスマッチング溶液使用時の x, y, z 方向へのミスアライメントと結合効率の関係を示す。

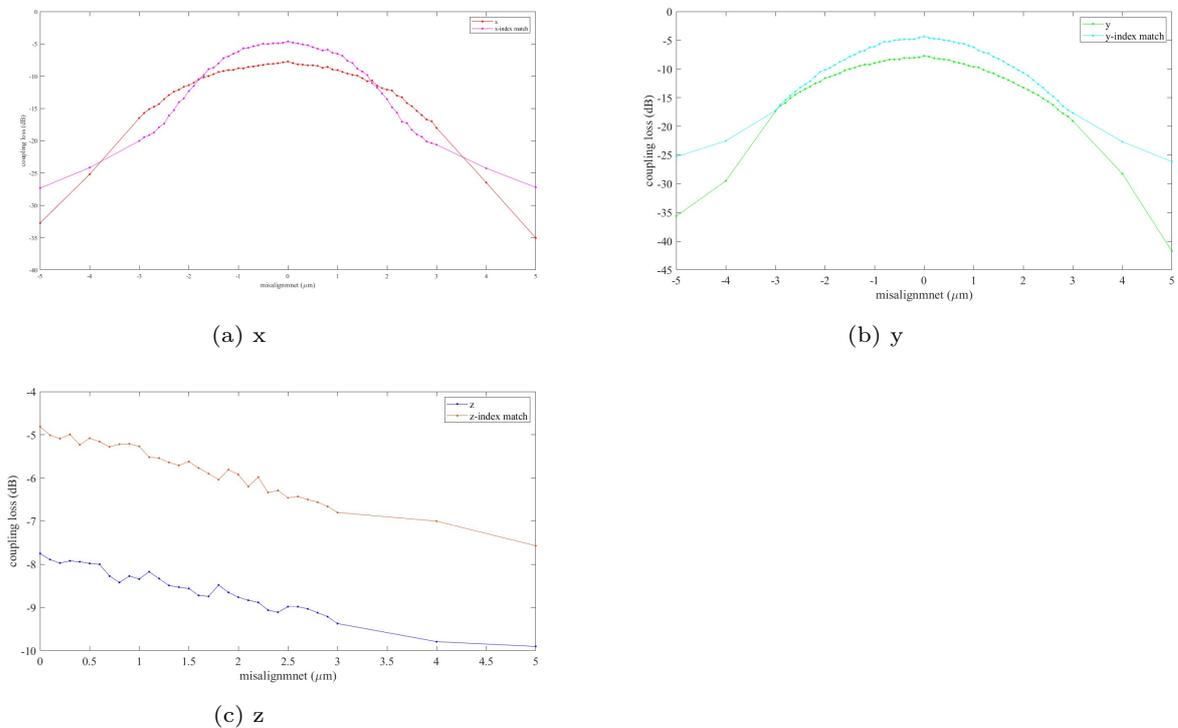


Fig. 4.6: インデックスマッチング溶液使用時の x, y, z 方向へのミスアライメントと結合効率の関係

z 方向に関してはインデックスマッチング溶液の使用により、各 z 軸距離において結合効率が上昇していることがわかる。また、 x, y 方向に関しては結合効率の上昇と、グラフ幅が狭まっていることが読み取れる。これはインデックスマッチング溶液の使用によりスポットサイズが狭まったことによるものと考えられる。

4.4.2 NA の検討

4.2.2 節と同様にして NA について検討する. Fig.4.7 に y 方向の FWHM を求めるグラフを示す.

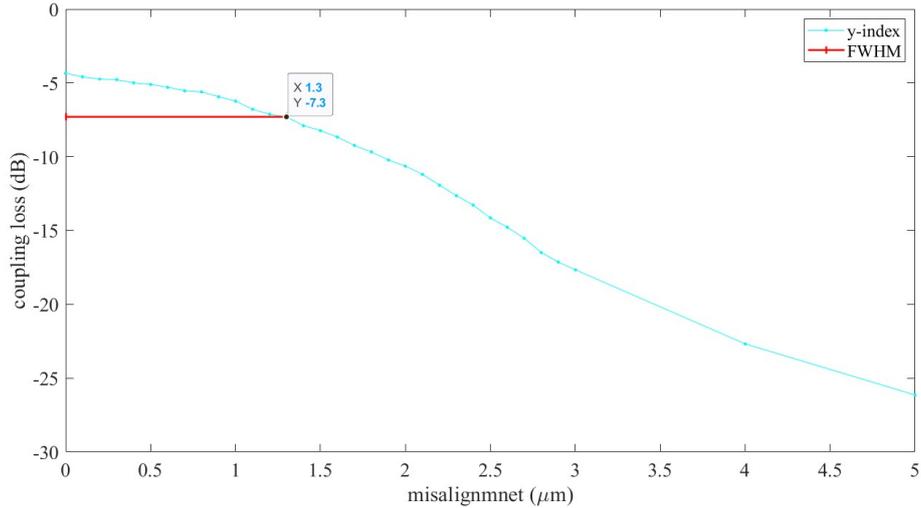


Fig. 4.7: y 方向の FWHM

これより FWHM が $1.3\mu\text{m}$ をスポット半径 w_{yi} として, NA は以下のように求められた.

$$\text{NA}_i = 0.61 \frac{\lambda}{w_{yi}} = 0.72$$

この値は 4.2.2 節で求めたインデックスマッチング溶液不使用時での NA の値よりも改善されている. このことから, インデックスマッチング溶液を用いることで導波された光をより集光することができたと言える. しかし, D_y は以下のように先ほど同様に過大な値であるので, やはりチップ間距離に問題があると言える.

$$D_y = \frac{1.22\lambda f}{nw} = 7.41$$

第5章

結論

本研究の目的は逆テーパ構造のエッジカプラを用いた SiN/Si 接合の結合効率とその他の結合特性の検討である。

実際に結合効率を求めたところ、チップ間に空気層のない理想的な状態でのシミュレーションにより求められた結合効率よりも大幅に低下した結合効率を得られた。これはチップ作製時の製造誤差により、チップ間に空気層ができたことにより、回折によりモードが広がったことに起因する部分が大きいと考えられるので、見積もられた空気層の厚みにおけるシミュレーションとの比較を行ったところ、シミュレーションに近い結合効率を得られていたことがわかった。これより、現状ある空気層領域を削減することで高い結合効率を得られるようになることが考えられる。また、各軸方向のミスアライメントと結合効率の関係から、チップ端面の NA を求めた。さらに、そこからインデックスマッチング溶液を用いて同様の実験を行い結合効率の改善を試みた。その結果、導波路からの光はより集光されるようになり、結合効率が改善する様子が見られた。以上のことにより、ゴニオステージなどを用いてチップ端面の角度を調整し、チップ間の空気層領域を減少させ、結合効率の上昇を図り、さらにインデックスマッチング溶液を用いるなどしてチップ間の損失を減少させていくことが今後の課題と言える。

本研究を通じて、調芯系の構築、アライメント方法などの基本事項やそれぞれのチップのモードプロファイルについての知見を深めることができた。また、自身の今後の研究に本研究を生かすと同時に今後の Si を用いた光集積回路の技術発展、光通信の更なる発展につながり、より良い社会に貢献できることを願う。

参考文献

- [1] Takayuki Mizuno,*et al.*,"Dense Space-Division Multiplexed Transmission Systems Using Multi-Core and Multi-Mode Fiber", *Journal of Lightwave Technology*,**34**,2,2016
- [2] T. Morioka, "New generation optical infrastructure technologies: "EXAT Initiative" towards 2020 and beyond," presented at the Optical Fiber Communication Conf., Hong Kong, 2009.
- [3] Y. Miyamoto, H. Takara,A. Sano, "Crosstalk-managed multicore fiber transmission with capacities beyond 1 Pbit/s," presented at the Asia Communications Photonics Conf., Beijing China, 2013.
- [4] T. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, "Optical frequency metrology," *Nature*, **416**, 233 – 237, 2002.
- [5] P. Kippenberg T.J.,*et al.* "Microresonator-based optical frequency combs", *Science* **332**, 6029, 555-559, 2011
- [6] Del'Haye P.;Schliesser A.;Arcizet O.;Wilken T.;Holzwarth R.;Kippenberg T. "Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator" *Nature*, **450**,7173, 1217-1217, 2007
- [7] Hugi,Andreas.;Villares,Gustavo.;Blaser,Stéphane;Liu H.C.; Faist,Jérôme."Mid-infrared frequency comb based on a quantum cascade laser",*Nature* **492**, 7428, 229-233,2012
- [8] Gohle, Christoph,*et al.* "A frequency comb in the extreme ultraviolet", *Nature* **436**, 7048, 234-237,2005
- [9] Delfyett, Peter J.,*et al.* A. Scherer,"Optical frequency combs from semiconductor lasers and applications in ultrawideband signal processing and communications", *Journal of Lightwave Technology* **24**, 7, 2701-2719, 2006
- [10] Liu, Ansheng,*et al.*, "Wavelength division multiplexing based photonic integrated circuits on silicon-on-insulator platform",*IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics* **16**, 1, 23 - 32, 2010
- [11] Abdul Rahim,*et al.*,"Expanding the Silicon Photonics Portfolio With Silicon Nitride Photonic Integrated Circuits",*JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, **35**, 4, 2017)
- [12] Blumenthal, Daniel J,*et al.*,"Silicon Nitride in Silicon Photonics",*Proceedings of*

- the IEEE Open Access, **106**,12, 2209-2231,2018
- [13] Nippon Telegraph and Telephone Corporation ,”High-performance optical modulators on silicon platform - Integration of compound semiconductors and silicon, providing compactness, low-power consumption, and low propagation loss -”,2017 [<https://group.ntt/en/newsrelease/2017/07/18/170718a.html>]
- [14] Wesley D. Sacher, *et al.*,”Multilayer Silicon Nitride-on-Silicon Integrated Photonic Platforms and Devices”,*JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, **33**, 4, 2015.
- [15] Christopher R. Doerr, Long Chen, Young-Kai Chen, Larry L. Buhl., ”Wide Bandwidth Silicon Nitride Grating Coupler”,*IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, **22**, 19, 2010
- [16] Xin Mu , Sailong Wu, Lirong Cheng, H.Y. Fu,”Edge Couplers in Silicon Photonic Integrated Circuits: A Review” ,*Applied Sciences Open Access* **10**,41 ,2020
- [17] Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich, *Fundamentals of Photonics* (Morikita Publishing, 2006).